社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.

UWBパルスレーダのための高速物体像推定法の安定化

木寺　正平†　　阪本　卓也†　　佐藤　　亨†

† 京都大学大学院 情報学研究科
〒 606–8501 京都府京都市左京区吉田本町
E-mail: †kidera@aso.cce.i.kyoto-u.ac.jp

あらまし　室内ロボットの空間測定技術として UWB パルスレーダを用いた方法が注目されている。我々はすでに境界散乱変換に基づく高速物体形状推定法として、SEABED 法を提案している。この手法は送受信アンテナを走査して得られる信号から到来波面を推定し、物体境界面との間に成立する可逆変換を用いて物体形状を推定する方法である。この手法は非常に高速であるという利点を持つ一方で、変換式において到来波面の微分値を用いていることから、雑音に対する推定像の著しい劣化が問題となる。本稿では、この問題を解決するため円包絡線集合を用いた物体境界面推定手法を提案する。提案手法により、凸形状物体については画像推定の雑音耐性を大幅に向上させ、かつ高速な物体境界線推定が可能であることを数値計算により示す。

キーワード　UWB パルスレーダ、SEABED、高速物体像推定、安定化、円包絡線集合

A fast and stable imaging algorithm for UWB pulse radar systems

Shouhei KIDERA†, Takuya SAKAMOTO†, and Toru SATO†

† Graduate School of Informatics, Kyoto University
Sakyou-ku, Kyoto, 606–8501, Japan
E-mail: †kidera@aso.cce.i.kyoto-u.ac.jp

Abstract　Target shape estimation with UWB pulse radars is promising as an imaging technique for household robots. We have already proposed a fast imaging algorithm, SEABED based on a reversible transform BST (Boundary Scattering Transform) between the received signals and the target shape. However the target image obtained by SEABED deteriorates in a noisy environment because it utilizes a derivative of received data. In this paper, we propose a robust imaging method by utilizing an envelope of circles. In a numerical simulation, we clarify that the proposed method can make it possible to realize a robust and fast imaging, which cannot be achieved by SEABED.

Key words　UWB pulse radar system, SEABED, fast imaging, robust imaging, envelope of circles

1. 序　　論

室内ロボット等のための高速、高解像度かつ安定な近傍界空間測定技術が必要となっている。更に近年 FCC で認可された UWB(Ultra Wide-Band) 信号を用いたレーダシステムが非常に高い距離分解能を達成する画像化技術として注目されている。現在、レーダを用いた画像化手法が多数提案されている [1]〜[4]。しかし従来の画像化手法では、何れも膨大な計算時間を必要としリアルタイムでの処理は困難である。これに対し、以前に我々は高速立体像推定法として UWB 信号を用いた SEABED 法と呼ばれる手法を提案している [5], [6]。この手法は、受信された波形画像から抽出された直接散乱波を用いて、散乱波の遅延時間変化と目標形状への可逆な変換関係を利用することにより境界面を推定する方法である。SEABED 法は受信画像が得られれば、非常に高速な画像化処理が可能であり従来の問題点を大幅に改善する手法である。しかし、この手法では擬似波面の微分値を用いているためにその揺らぎに対して著しい推定像の劣化があることが問題となる。室内環境計測においては、白色雑音による到来波面のゆらぎが存在し、この推定像の劣化を改善する手法が必要である。

本稿ではこの問題を解決するため、円包絡線集合を用いた新たな境界面推定手法を提案する。提案手法により、凸形状物体に対して擬似波面に揺らぎがある場合でも安定した境界面推定が可能であり、従来手法と比較して大幅に雑音耐性が向上することを数値計算により示す。提案手法は従来法の利点であった高速性を保持し、また雑音レベルが低いときには安定かつ高解像度な形状推定を実現することを示す。

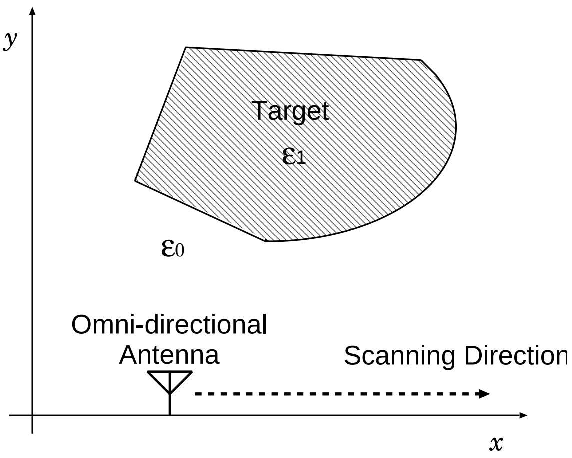

図 1　システムモデル

2. システムモデル

図 1 にシステムモデルを示す。本稿では TE 波、2 次元問題及び凸型形状物体を仮定する。伝搬空間は非分散等方性媒質を仮定する。目標物体は一様な誘電率を持ち、明瞭な境界を持つものとする。無指向性アンテナを x 軸上で直線走査し、各素子で受信時間波形を取得する。送信素子に与える電流波形はモノサイクルパルスとする。目標物体が存在する空間を r 空間と定義し、その空間は送信電流の中心波長 λ で正規化する。素子を x 軸上に配置し、素子位置 $(x, y) = (X, 0)$ と定義する。この時の時間領域での受信電界を $s'(X, Y)$ とする。但し $Y = \mathrm{c}t/(2\lambda)$、c は光速とする。$s(X, Y)$ を、送信波形を用いた整合フィルタに通した時の出力波形とする。この出力波形のピーク値をつないだ曲線を (X, Y) とし擬似波面と呼ぶ。また (X, Y) が存在する空間を d 空間と定義する。本稿では d 空間から r 空間への変換により目標形状推定を実現する。

3. 従 来 手 法

本節では従来手法として SEABED 法について述べる。この手法では、到来波面を表す擬似波面 (X, Y) と物体境界を表す (x, y) の間の可逆な変換関係を用いる。図 2 に (X, Y) と物体境界上の点 (x, y) の関係を示す。r 空間で (X, Y) と (x, y) が同図に示す関係を満たす時、両空間の間には $|\mathrm{d}Y/\mathrm{d}X| \leqq 1$ という条件下で次の可逆な変換式が成立する。

$$\left.\begin{array}{rcl} X &=& x + y\mathrm{d}y/\mathrm{d}x \\ Y &=& y\sqrt{1 + (\mathrm{d}y/\mathrm{d}x)^2} \end{array}\right\} \tag{1}$$

$$\left.\begin{array}{rcl} x &=& X - Y\mathrm{d}Y/\mathrm{d}X \\ y &=& Y\sqrt{1 - (\mathrm{d}Y/\mathrm{d}X)^2} \end{array}\right\} \tag{2}$$

前者 (1) を境界散乱変換 (Boundary Scattered Transform;BST と略称)、後者 (2) を逆境界散乱変換 (Inverse BST;IBST と略称) と呼ぶ。この可逆な変換関係により、直接散乱波から抽出される擬似波面より直接的に物体境界面を推定することができる。この手法は擬似波面 (X, Y) が与えられれば、Xeon 3.2 GHz プロセッサーで約 0.01 秒で 2 次元画像が得られ、非常に高速である。

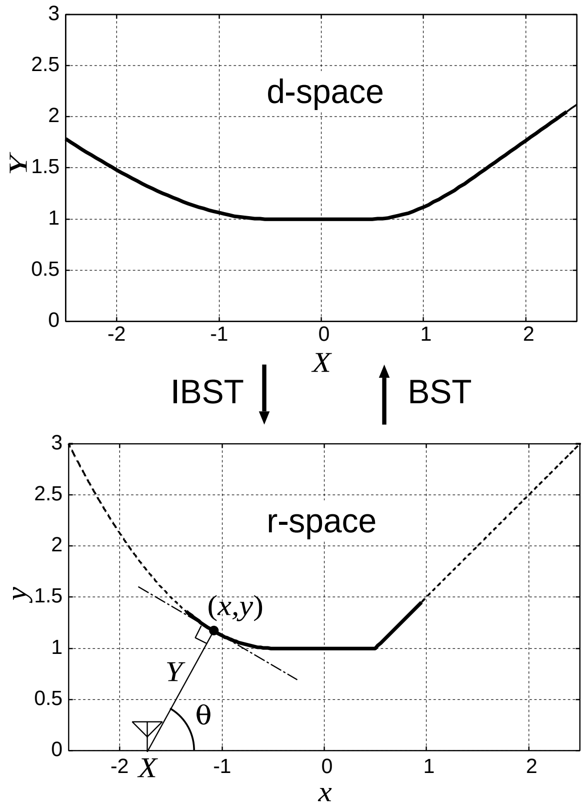

図 2　SEABED 法での r 空間と d 空間の関係

しかしながら、式 (2) の IBST は擬似波面の微分値 $\mathrm{d}Y/\mathrm{d}X$ を用いているため、Y に微少な揺らぎがある場合、推定像が著しく劣化することが確認されている。その解析的な説明を以下に示す。IBST は図 2 の θ を用いることにより次式で表される。

$$\left.\begin{array}{rcl} x &=& X + Y\cos\theta \\ y &=& Y\sin\theta \end{array}\right\} \tag{3}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1 - (\mathrm{d}Y/\mathrm{d}X)^2}}{\mathrm{d}Y/\mathrm{d}X}\right), \quad (0 \leqq \theta \leqq \pi) \tag{4}$$

よって IBST による推定点は半径 Y 中心 $(X, 0)$ の円上に存在し、その角度は $\mathrm{d}Y/\mathrm{d}X$ により決定される。Y の揺らぎが非常に小さな場合でも、$\mathrm{d}Y/\mathrm{d}X$ がその揺らぎを強調するために角度推定誤差が増大し、推定像が容易に劣化する。

図 3 に真の擬似波面に標準偏差 0.005 の白色雑音を加えた擬似波面とこの擬似波面に IBST を適用した時の推定境界線を表す。アンテナ走査範囲は $-2.5\lambda \leqq x \leqq 2.5\lambda$ に等間隔に 101ヶ所でサンプルする。推定像の劣化を抑えるために平滑化による安定化手法 [7]、及び部分境界散乱変換を用いた平滑化法が提案されている [8]。ここでは、文献 [7] と同様に擬似波面に標準偏差 0.02λ のガウス関数による平滑化を適用する。同図より Y には非常に小さな揺らぎを与えているにも関わらず、角度推定精度が微分値の誤差により大きく劣化した推定点が多数存在する事が確認できる。

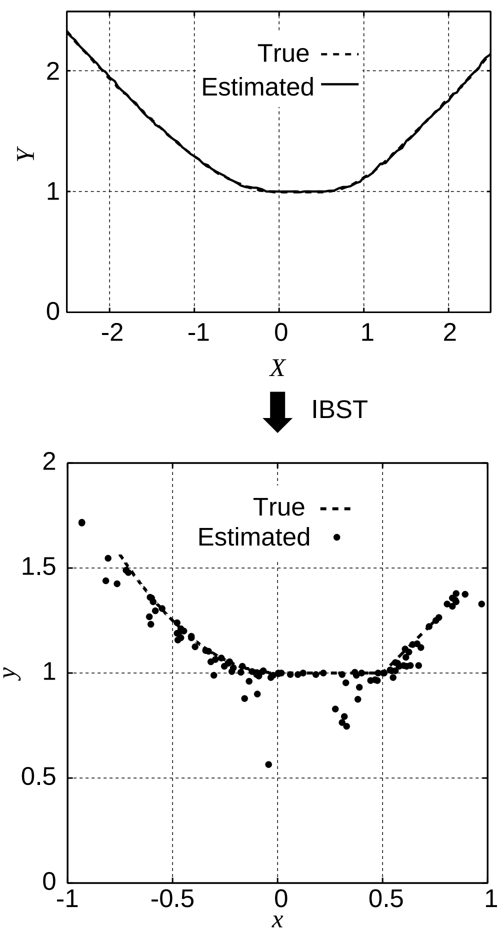

図 3　微少な揺らぎを与える擬似波面 (上) と SEABED 法による推定像 (下)

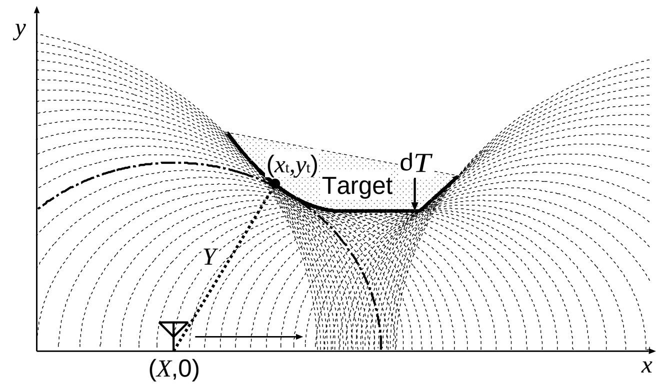

図 4　物体境界線集合と円包絡線集合の関係

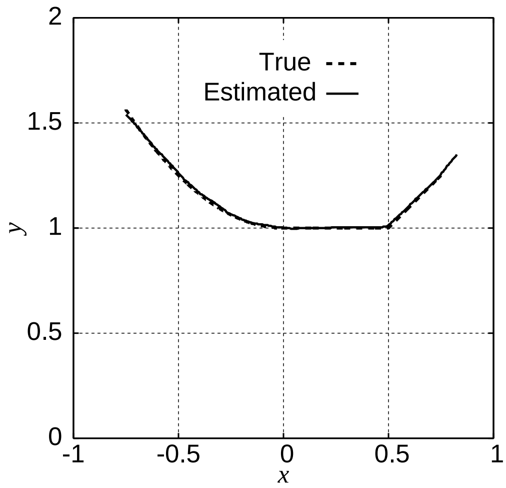

図 5　提案手法による推定像

4. 提案手法

4.1　円包絡線集合と物体境界線集合

前節で述べた問題を解決するため、本節では円包絡線集合を用いた目標物体境界推定手法を提案する。まず本手法の基礎となる円包絡線集合と物体境界線集合との間に成立する関係を明らかにする。図 4 に円包絡線集合と物体境界線集合の関係を示す。目標物体の形状 ∂T をある定義域 Γ 内で連続な一価関数 $f(x) > 0$ により表す。また図 4 に示す通り x 軸上のアンテナ位置 $(X, 0)$ と $(x, f(x))$ 上の点との距離が最小となる点を $(x_{\rm t}, y_{\rm t})$ とし、$x_{\rm t} = g(X)$ と表す。またその最小距離を Y と定義する。この (X, Y) で構成される実数集合を ∂C とする。∂C は d 空間上の擬似波面に対応する。$(X, 0)$ を中心とする半径 Y の円内の点 (円周を除く) の集合を S' と定義する。∂C 上の全ての点において、各要素に対応する S' の和集合を

$$S = \bigcup_{x \in \Gamma} S' \tag{5}$$

とする。ここで、$x \in \Gamma$ 上での S の集積点集合を ∂S とし、これを円包絡線集合と呼ぶ。この時、次の命題が成立する。

［命題 1］　$x_{\rm t} = g(X)$ が $x \in \Gamma$ において、連続な一価関数である時、

$$\partial S = \partial T \tag{6}$$

が成立する (証明は付録 A-1 参照)。

この命題を利用して、推定された擬似波面から求まる円包絡線集合 ∂S を得ることで目標形状を推定する。また上記の命題の条件 $x_{\rm t} = g(X)$ は $f(x)$ が凸関数であれば満たされる。

4.2　提案手法の処理手順

以下では、前節の提案形状推定法の実際の処理手順について述べる。まず送受信素子の整合フィルタの出力波形 $s(X, Y)$ のピーク値から、擬似波面 (X, Y) を抽出する。定義域 Γ 内の x に対して目標形状 y を次式で得る。

$$y = \max_{X} \sqrt{Y^2 - (x - X)^2} \tag{7}$$

但し、(x, y) は $x \in \Gamma$ を満たさない点では、目標形状に対応しない。この領域において (x, y) は X の両端に対応する円弧を描くためである。よって $(X, Y) \in \partial C$ の X の最大値、最小値に対応する 2 点に対応する (x, y) を取り除き、最終的な推定目標物体形状を得る。

この手法では擬似波面から得られる (X, Y) のみの情報を用いており、その微分値 $\mathrm{d}Y/\mathrm{d}X$ に依存しない物体境界面推定が可能となる。即ち SEABED 法の問題であった擬似波面に対する微少な揺らぎに対しての推定像の劣化は、微分値を用いない本手法では本質的に生じない。

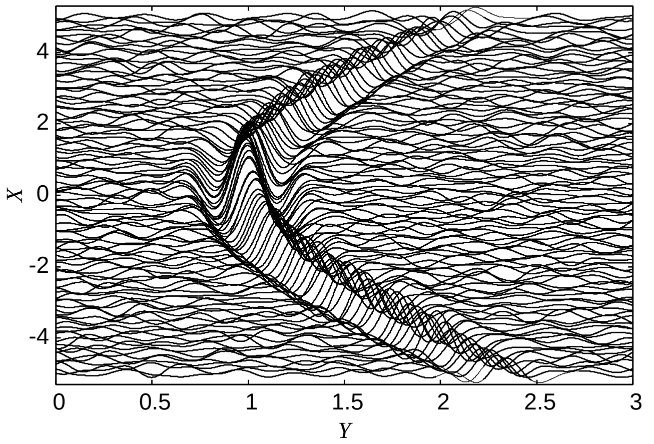

図 6　整合フィルタの出力波形 $s(X, Y)$

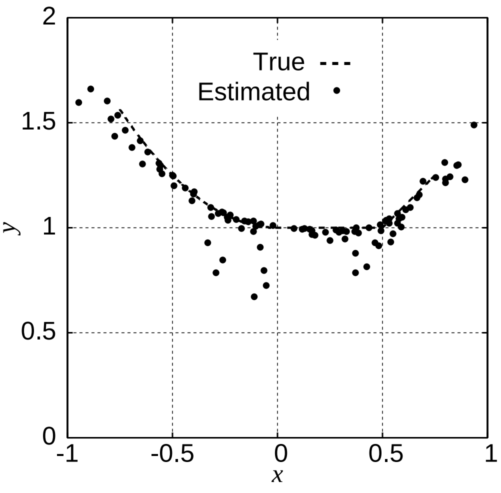

図 7　SEABED 法による推定像 (擬似波面:FDTD 法により作成)

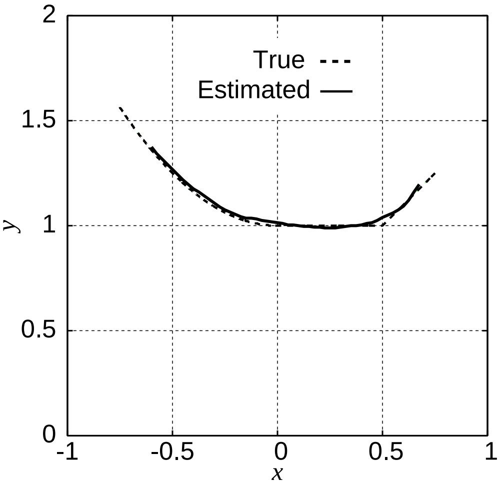

図 8　提案手法による推定像 (擬似波面:FDTD 法により作成)

5. 推定精度評価

5.1 形状推定評価

以下に従来法と提案法の形状推定評価を示す。本評価においては、擬似波面に真値を与える場合と FDTD 法により生成される受信データから抽出される擬似波面を与える場合の 2 種類について検討する。まず真の擬似波面に標準偏差 0.005 の白色雑音を与える場合について説明する。図 5 は図 3 の擬似波面に提案手法を適用した場合の推定境界線集合である。同図より従来法の推定を表す図 3 と比較して、境界点集合の中に大きな誤差は存在せず、微少な擬似波面に対して安定かつ高精度な境界面推定が可能であることが確認できる。これは IBST が擬似波面の情報を局所的に利用しているのに対し、提案手法は擬似波面の大域的な情報を用いていることに起因する。

次に散乱波形を FDTD 法で作成した時の推定境界面精度について述べる。図 6 は受信波形に送信波形を用いた整合フィルタを適用した時の出力波形である。雑音は白色雑音を仮定する。この時の SN 比は、約 5.5dB である。本稿では SN 比を、整合フィルタ通過後の周波数領域での信号と雑音の振幅比を以て SN 比と定義する。擬似波面の平滑化には、同様に標準偏差 0.02λ のガウス関数による平滑化法を用いる。また図 7、8 は図 6 の出力波形から抽出される擬似波面に従来法及び提案法を適用する場合の推定像を表す。図 7 より従来手法では、擬似波面の微分に起因する推定像の劣化が起こっている事が確認できる。これに対して、図 8 での提案手法では推定像はほぼ真値に近づいておりまた安定した推定が可能である事が確認出来る。またエッジ付近の推定像が滑らかになっているが、これは送信波形と受信波形の相違に起因するもであり、更なる高解像度を達成するには、波形推定を組み合わせる必要がある。また計算時間は、擬似波面が得られてから Xeon 3.2 GHz プロセッサーで約 0.02 秒と非常に高速な処理が可能である。

5.2 雑音に対する推定精度限界

本節では雑音に対する提案手法の精度限界について評価する。ここで形状推定誤差を定量的に評価するため、次式で表す平均誤差 μ 及び標準偏差 σ の評価値を用いる。

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N}|e(x_i)| \tag{8}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N}|e(x_i)|^2 - \mu^2} \tag{9}$$

但し、$e(x) = y_{\mathrm{true}}(x) - y_{\mathrm{e}}(x)$ である。ここで、$y_{\mathrm{true}}(x)$ は真の物体境界面を表す関数であり、$y_{\mathrm{e}}(x)$ は推定物体境界面上の点を表す。図 9、10 はそれぞれ真の擬似波面にガウス分布型の雑音を与えた時の推定精度の μ と σ を示す。横軸は雑音の標準偏差である。両図より μ と σ のどちらも従来手法より改善している事が確認できる。μ においては約 3 倍、σ においては約 8 倍ほどの精度改善が得れ、従来法よりも大幅に雑音耐性が向上することが確認できる。またこれらの改善は全ての雑音強度について得られ、どのような雑音環境下においても提案手法が優位であることを示している。

また図 11、12 は FDTD 法で作成した受信波形での雑音に対する推定精度を示す。横軸は SN 比である。両図より、推定精度の平均と標準偏差どちらにおいても提案手法が優位であることが確認できる。特に SN 比が約 10dB 以上であれば、提案手法は無雑音環境下と同程度の推定精度が達成可能である。本手

法では受信信号を時間領域で用いることから、波形をコヒーレント積分することにより、UWB 信号の規定電力以内であっても容易に 10dB の SN 比を得ることが出来る。本稿ではアンテナを直線上に走査することを仮定しているが、本手法は容易に任意の曲線上走査への拡張が可能である。このような高解像度かつ雑音に対する安定性を両立した目標物体推定は従来手法では達成困難であり、注目すべき特徴であると考える。

6. まとめ

円包絡線集合を用いた高速かつ安定な物体像推定法を提案した。目標が凸形状物体である場合について、本手法は SEABED 法と比較し、雑音耐性の点で劇的な改善を達成することを数値計算により示した。また雑音レベルが低い場合では、本手法は SEABED 法の特徴である高速高解像度を保持することを示した。本稿では数値計算においてアンテナ素子数を十分多く配置したが、アンテナ本数が少ない時は推定像に誤差が生じる。しかしこの手法は、バイスタティックアンテナシステムにも容易に拡張可能であり、アレイアンテナを用いれば少ないアンテナ素子数でも高精度な形状推定が可能であることを確認している。また目標形状が曲率の大きな凹形状物体に対しては、積集合を組み合わせることにより、物体境界線を表すことが可能となる。しかし、擬似波面において焦点を通過する場合とそうでない場合にの 2 種類に判別する必要があり、安定した判別法を開発することが今後の課題となる。

謝　辞

本研究の一部は 21 世紀 COE プログラムによる (Grant No. 14213201)。

文　献

[1] C. Chiu, C. Li, and W. Chan, "Image reconstruction of a buried conductor by the genetic algorithm," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E84-C, no. 12, pp. 1946–1951, 2001.

[2] T. Takenaka, H. Jia, and T. Tanaka, "Microwave imaging of an anisotropic cylindrical object by a forward-backward time-stepping method," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E84-C, no. pp. 1910–1916, 2001.

[3] T. Sato, K. Takeda, T. Nagamatsu, T. Wakayama, I. Kimura and T. Shinbo, "Automatic signal processing of front monitor radar for tunneling machines," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.35, no.2, pp.354-359, 1997.

[4] T. Sato, T. Wakayama, and K. Takemura, "An imaging algorithm of objects embedded in a lossy dispersive medium for subsurface radar data processing," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.38, no.1, pp.296–303, 2000.

[5] T. Sakamoto and T. Sato, "A target shape estimation algorithm for pulse radar systems based on boundary scattering transform," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E87-B, no.5, pp. 1357–1365, 2004.

[6] T. Sakamoto and T. Sato, "A phase compensation algorithm for high-resolution pulse radar systems," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E87-B, no.6, pp. 1631–1638, 2004.

[7] T. Sakamoto and T. Sato, "An experimental study on a fast and accurate 3-D imaging algorithm for UWB pulse radar systems," 28th General Assembly of International Union of Radio Science (URSI), F05.7, New Delhi, India, Oct, 2005.

[8] 阪本 卓也, 佐藤 亨, "適応的部分境界散乱変換による UWB パルスレーダのための高精度形状推定法," 第 34 回電磁界理論シ

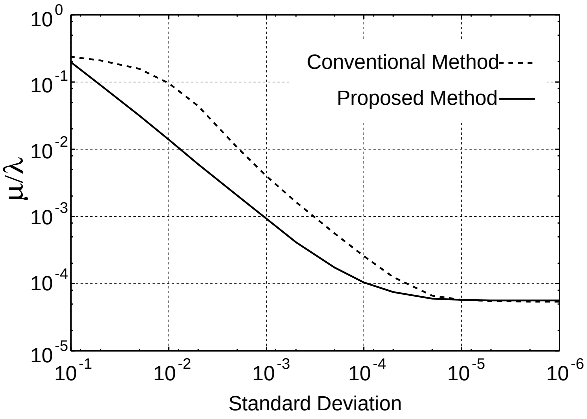

図 9　μ の推移 (真の擬似波面に雑音を与えた場合)

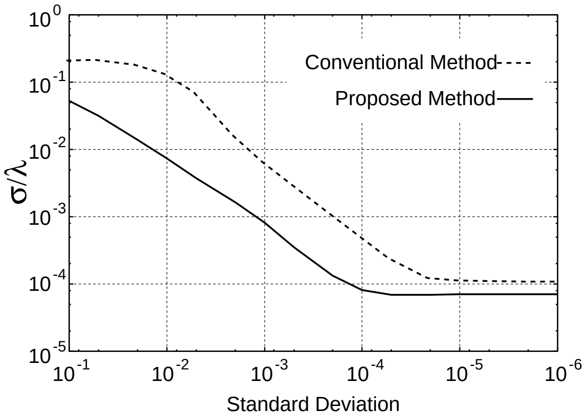

図 10　σ の推移 (真の擬似波面に雑音を与えた場合)

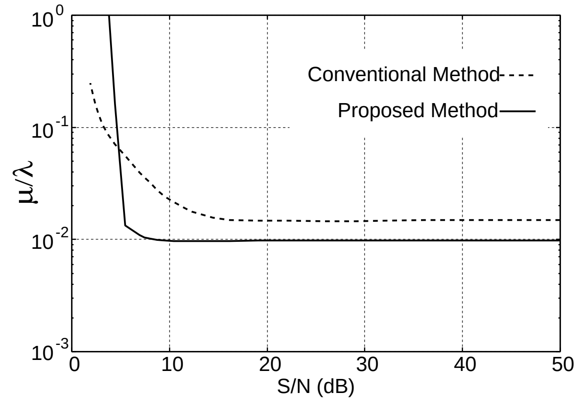

図 11　μ の推移 (FDTD 法による散乱波形に雑音を与えた場合)

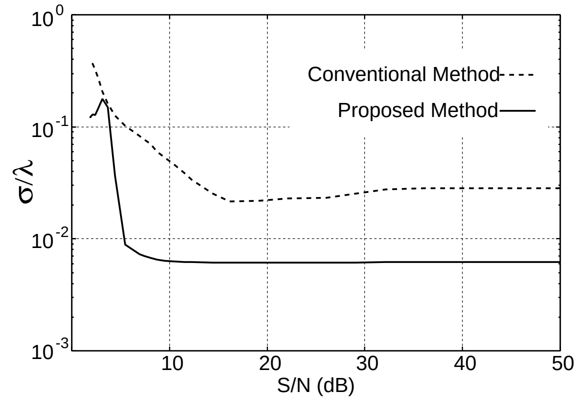

図 12　σ の推移 (FDTD 法による散乱波形に雑音を与えた場合)

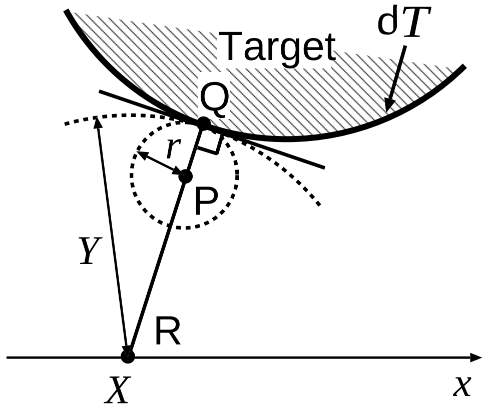

図 A·1　∂T と点 P, Q, R の関係

ンポジウム, EMT–05–57, 栃木県 那須塩原, Nov, 2005.

付　　録

A-1 命題 1 の証明

(i) $\partial S \subset \partial T$ を示す。

$P \in \partial S$、$P \cap \partial T = \phi$ を満たす点 $P = (x_{\rm p}, y_{\rm p})$ が存在すると仮定する。ここで ϕ は空集合である。点 P と ∂T 上の点との距離が最小となるような ∂T 上の点を $Q = (x_{\rm q}, y_{\rm q})$ とし、その距離を r とする。直線 PQ と x 軸が交わる点を R とする。図 A·1 に ∂T と点 P, Q, R の関係を示す。この時、$g(X)$ が一価連続であることにより $(x_{\rm q} - X)^2 + y_{\rm q}^2 = Y^2$, $\overline{QR} = Y, R = (X, 0)$ となるような点 Q, R 及び $(X, Y) \in \partial C$ の要素が唯一存在する。また $P \in \partial S$ より $\overline{PR} = Y$ を満たさなければならないが、図 A·1 より明らかに、$\overline{PQ} < \overline{QR} = Y$ でありこの条件を満たさない。よって仮定は矛盾し $\partial S \subset \partial T$ が示される。

(ii) $\partial T \subset \partial S$ を示す。

$P^{'} \in \partial T$、$P^{'} \cap \partial S = \phi$ を満たす点 $P^{'} = (x_{\rm t}, y_{\rm t})$ が存在すると仮定する。$x_{\rm t} = g(X)$ は一価連続関数より、

$$(x_{\rm t} - X_1)^2 + y_{\rm t}^2 = Y_1^2 \tag{A·1}$$

を満たす $(X_1, Y_1) \in \partial C$ が唯一存在する。ここで (X, Y) の定義より、点 $P^{'}$ において任意の $(X, Y) \in \partial C$ に対し、

$$(x_{\rm t} - X)^2 + y_{\rm t}^2 \geqq Y^2 \tag{A·2}$$

である。よって式 (5) より $P^{'} \cap S = \phi$ が成立する。しかし $P^{'}$ は式 (A·1) を満たすので、S の集積点上に存在し、$P^{'} \in \partial S$ である。よって仮定は矛盾し、$\partial T \subset \partial S$ が示される。